

論文 Original Paper

重心動揺解析によるエリートシンクロナイズドスイマーの
バランス能力和田 匡史^{*1}, 大石 健二^{*2,3}, 佐藤 孝之^{*3}
山本 憲志^{*4}, 新宅 幸憲^{*5}, 松本 高明^{*6}The Balance Ability of Elite Synchronized Swimmers in
an Analysis of the Postural SwayTadashi Wada^{*1}, Kenji Ohishi^{*2}, Takayuki Sato^{*3}
Noriyuki Yamamoto^{*4}, Yukinori Shintaku^{*5}, Takaaki Matsumoto^{*6}

Abstract: Synchronized swimmers must perform the technical and free routines program while keeping balance underwater. A synchronized swimmer needs highly balance ability. In sports activity, it is important that muscular strength is coordinated as well. In particular, muscle coordination during aquatic sports (swimming, water polo, synchronized swimming) were most important factor to improve human performance. The purpose of this study was to examine the balance ability in elite synchronized swimmers. Twenty-three female synchronized swimmers (international elite level and junior international level) participated in this study. Postural sway was measured by a piezo-electric force platform (9281E, KISTLER, Swiss). To measure the balance ability, the center of pressure (COP) displacement of the ground reaction force was recorded at a frequency of 20 Hz while the subjects were taking static standing position with opened eyes or closed eyes on the force platform for 30 seconds. The total length of COP displacements (LNG) and total movement area of COP (Environmental area : ENV. area, Rectangle area : REC. area) were calculated as an indicator of the balance ability. The synchronized swimmers were more superior in the total length of COP displacements (elite : Open eye LNG : 26.15 ± 7.96 cm, Closed eye LNG : 36.32 ± 11.36 cm, junior : Open eye LNG : 30.48 ± 7.43 cm, Closed eye LNG : 36.04 ± 10.35 cm). The total area of COP displacements (ENV. area) showed 0.91 ± 0.60 cm² (elite) and 1.39 ± 0.77 cm² (junior) in open eyes static standing position. The total area of COP displacements (REC. area) showed 2.29 ± 1.48 cm² (elite) and 3.83 ± 2.56 cm² (junior) in open eyes static standing position. Average values and SD of percentage of center of gravity (anatomical posture) and percentage of center of gravity (both hand-up posture) were $53.3 \pm 0.8\%$ and $57.0 \pm 0.7\%$, respectively. The synchronized swimmer had a short LNG in comparison with the normal student. In addition, the LNG in open eyes standing position was significantly shorter in the elite synchronized swimmer than in the junior synchronized swimmer. On the other hand, there was no significantly difference in the LNG during closed eyes. It is clear that the elite synchronized swimmers had high balance ability during the static standing position.

Key words: Balance ability, Postural sway, Synchronized swimming

^{*1} 理工学部理工学科健康医工学系 准教授, 博士 (医学)
School of Science and Engineering, Department of Health
and Medical Engineering
E-mail : twada@kokushikan.ac.jp

^{*2} 松山大学

^{*3} 日本体育大学大学院

^{*4} 日本赤十字北海道看護大学

^{*5} びわこ成蹊スポーツ大学

^{*6} 国士舘大学体育学部

1. はじめに

シンクロナイズドスイミングは、水中および水上で巧みな身体表現を行い、演技力、巧緻性、スピード、技の完成度などの要素から得点が判定され勝敗が決定する。

近年、演技時間の短縮によって高強度のパワーを発揮し続ける演技構成になり、選手には高い身体能力が求められるようになった^[1]。また、地面反力の得られない水

中環境の中で筋力を発揮して泳ぐ、跳ぶ、静止するといった動作を行うため、より効率よく動くために高い身体バランス能力も求められる。近年は水中、水上の映像から動作分析を行い、シンクロナイズドスイミングの演技動作を数値によって客観的に評価できるようになった^[2]。

シンクロナイズドスイミング競技は、足が水底に届かない深い水深のプール内で行われ、選手は常に上肢によるスカーリング動作、下肢による巻き足動作（立ち泳ぎ）を行って水中で移動したり、静止したりして身体姿勢を保っている。スカーリング動作とは、水中で腕を左右に動かしながら手のひらで水を掻き分ける動作で、手首の角度を変化させることで、水中における身体の静止、移動といった動作に対応することができる。巻き足動作は、エッグビーターキックとも呼ばれ、それぞれ交互に両下肢の膝から下の下腿部、足部を回転させて、浮力および推進力を得る動作であり、水中で身体を保持するために最も重要な動作の一つである^[3]。

人間のバランス能力は、様々な器官が関与している。視覚系、体性感覚系、前庭系、筋骨格系などの器官が、それぞれ機能することで静的姿勢の保持や、平衡を失った姿勢からの回復などが行われる。日本の肥満女兒を対象に重心動揺検査を行った研究では、体重の重さ、足のサイズといった形態的要因が重心の安定に貢献していることが示唆されている^[4]。

重心動揺は、身体の静的な姿勢保持機能を評価するためによく使われている^[5, 6, 7]。その測定は、立位姿勢を保持し、その時の身体重心から地面に垂直に降ろされた線と地面の交点の振れをみることで評価される。しかし、一般的に用いられている手法は、フォースプレート（圧力板）上にて地面反力を測定し、両足で囲まれた身体を支持するための基底面内の足圧中心の動揺を測定し、その値を重心動揺として扱われている。長谷^[8]は、フォースプレートから得られる重心動揺解析の主なパラメータを姿勢動揺の大きさや速さ、姿勢動揺の方向、身体的位置、パワースペクトルにまとめている。立位姿勢における重心動揺を評価することは、身体の様々な器官の機能評価を行うことができ、スポーツ選手においては競技力向上に繋がるデータを得ることができると考えられる。

本研究の目的は、エリートシンクロナイズドスイミング選手の身体重心動揺測定および体力測定からバランス能力を明らかにし、競技力との関連を調べることである。

2. 方 法

2.1 被検者

被検者は2010ジャパンオープンに出場したシンクロナイズドスイミング選手23名（年齢 16.7 ± 1.7 歳、身長 160.8 ± 4.4 cm、体重 49.6 ± 5.6 kg）であり、競技レベルによってエリート群（12名）、ジュニア群（11名）に分類

した。被検者の身体的特徴を表1に示す。測定を行う前に、測定項目および測定方法について十分な説明を行い、危険の無いことを確認した上で参加の同意を得た。

2.2 重心動揺測定

重心動揺（足圧中心動揺）は、フォースプレート（KISTLER社製9281E, サイズ $600 \times 400 \times 100$ mm, Swiss, 図1）によって地面反力を測定し、その時の足圧中心の軌跡長を計測した。測定動作は、フォースプレート上に安静立位姿勢をとらせ開眼および閉眼でその姿勢を30秒間維持させた（図2）。また、被検者の3m前に目標となるマークを置き、測定中そのマークを目視させた。床反力は、20Hzの周波数で記録した。

表1 被検者の身体的特徴
(エリート: n=12, ジュニア: n=11)

| Group | Elite | Junior |
|--------------------------|-------------|-------------|
| | Mean (SD) | Mean (SD) |
| Age (years) | 18.0 (1.7) | 15.4 (1.5) |
| Height (cm) | 162.1 (3.0) | 159.4 (5.4) |
| Weight (kg) | 52.8 (2.4) | 46.2 (6.2) |
| BMI (kg/m ²) | 20.0 (1.8) | 18.2 (2.4) |
| %fat (%) | 17.3 (3.8) | 15.1 (5.2) |

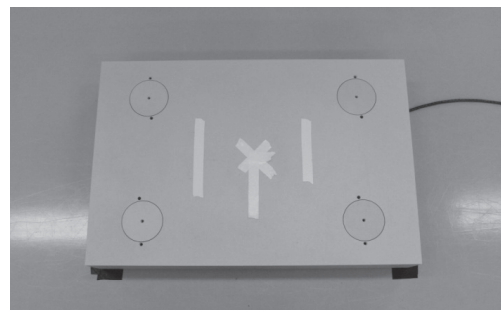


図1 重心動揺測定に用いたフォースプレート
(Piezo-electric force platform 9281E, KISTLER, Swiss)

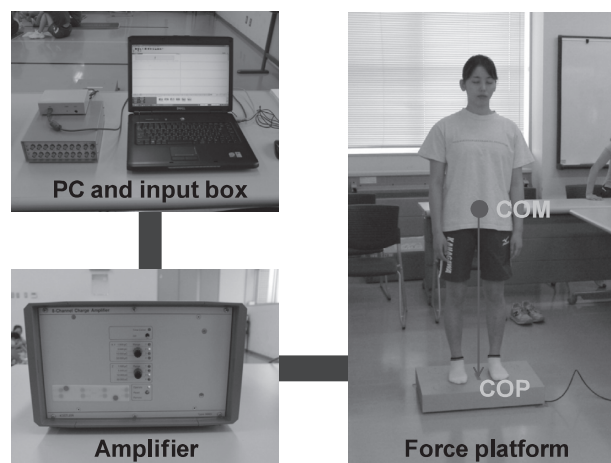


図2 重心動揺（足圧中心動揺）測定の模式図

2.3 重心動揺解析

重心動揺の解析は、TRIAS software (DKH 社製, 東京) を使用し, 足圧中心点の総軌跡長 (Total length of COP : LNG), 外周面積 (Environmental area : ENV. area), 矩形面積 (Rectangle area : REC. area), 実効値面積, 単位軌跡長, 単位面積軌跡長を算出した。総軌跡長, 外周面積, 矩形面積の一例を図3に示す。

$$LNG = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(AX_{i+1} - AX_i)^2 + (AY_{i+1} - AY_i)^2} \quad (1)$$

式(1)は, 総軌跡長を示し, 足圧中心点の移動距離の総和である^[9, 10]。

$$ENV.area = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |AX_{i+1}AY_i - AX_iAY_{i+1}| \quad (2)$$

式(2)は, 足圧中心点の総軌跡長で囲まれる面積で, 外周面積 (ENV. area) を示す^[9, 10]。

矩形面積は, 足圧中心点の軌跡のX方向Y方向の最大の幅を辺とした矩形の面積を算出した^[4, 5]。

$$S = \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{(AX_i - AX_{mean})^2 + (AY_i - AY_{mean})^2\}} \right)^2 \times \pi \quad (3)$$

式(3)は, 足圧中心動揺を正弦交流のような周期波形とみなし, その実効値 (RMS) を半径とした円の面積をあらわし, nは計測データ数, AX_i , AY_i は重心の座標値, AX_{mean} , AY_{mean} は重心座標の平均を示す^[9, 10]。

単位軌跡長は, 重心の平均移動速度をあらわし, 総軌跡長[cm]/計測時間[sec]で算出し, 単位面積軌跡長は, 総軌跡長[cm]/外周面積[cm²]にて算出した^[9, 10]。

2.4 体力測定

体力測定は, 最大筋力 (握力, 背筋力), 筋持久力 (上体おこし: 30秒間の腹筋運動), 瞬発力 (立ち幅跳び, 垂直跳), 敏捷性 (反復横跳び, 全身反応時間, ステッピング), 柔軟性 (長座体前屈) を行った。

2.5 統計分析

重心動揺測定, 体力測定データは, 平均値および標準偏差で表した。また, エリート群, ジュニア群間の有意差検定は, Student's t-testによって行った。有意水準は5%未満とした。

3. 結 果

3.1 足圧中心点の総軌跡長

足圧中心点の総軌跡長は重心動揺の大きさをあらわし, 距離が長ければ動揺も大きいということになる。開眼および閉眼状態における30秒間の安静立位姿勢保持

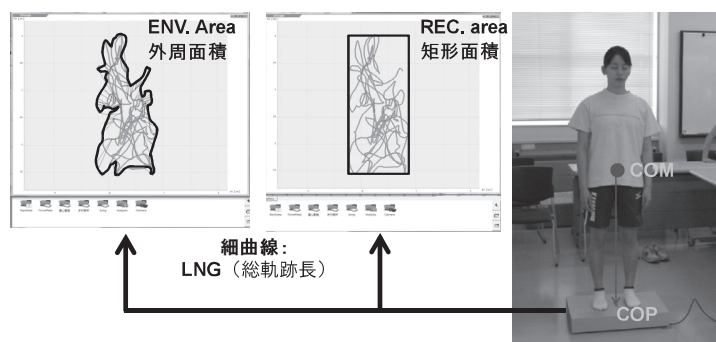


図3 足圧中心点の総軌跡長 (LNG: 細曲線), 外周面積 (ENV.area) と矩形面積 (REC.area) の一例

中の足圧中心点の総軌跡長は, 両群とも開眼時と閉眼時で有意な差が認められた (エリート: 26.1 ± 8.0 cm vs 36.3 ± 11.4 cm, $p < 0.05$, ジュニア: 30.5 ± 7.4 cm vs 36.0 ± 10.4 cm, $p < 0.05$, 図4)。開眼時の総軌跡長は, エリート群がジュニア群に比べて有意に短かった (26.1 ± 8.0 cm vs 30.5 ± 7.4 cm, $p < 0.05$, 図4)。一方, 閉眼時の総軌跡長は, 両群間に有意な違いは見られなかった (図4)。

3.2 外周面積

足圧中心点の総軌跡長で囲まれる外周面積は, 開眼, 閉眼状態間には有意な違いは見られなかった。また閉眼時のエリート, ジュニア群間にも有意差は見られなかったが, 開眼時の外周面積にのみ両群間に有意な違いがみられ, エリート群の方が面積は小さかった (図5)。

3.3 矩形面積

足圧中心点の軌跡のX方向Y方向の最大の幅を辺とした矩形面積の結果を図3に示す。矩形面積も外周面積と同様に開眼時のエリート群においてジュニア群に比べて有意に面積が小さかった (図6)。

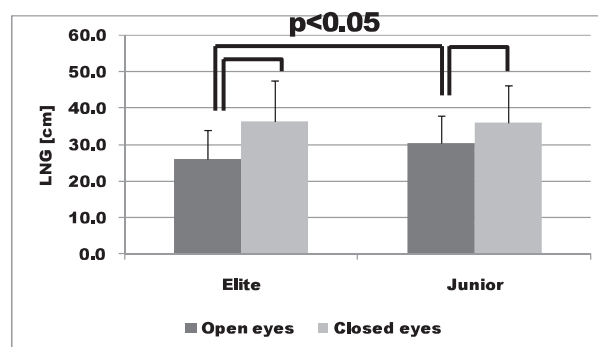


図4 安静立位姿勢中のエリート, ジュニアシンクロナイズドスイミング選手間および開眼と閉眼間の総軌跡長 (LNG) の比較

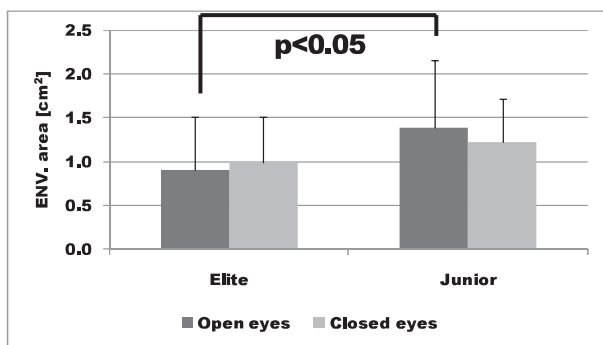


図5 安静立位姿勢中のエリート、ジュニアシンクロナイズドスイミング選手間の足圧中心変動の外周面積 (ENV. area) の比較

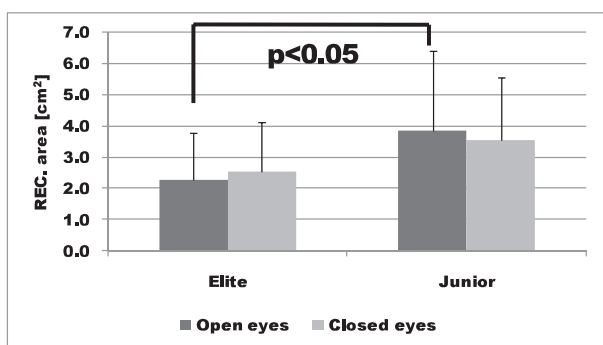


図6 安静立位生成中のエリート、ジュニアシンクロナイズドスイミング選手間の足圧中心変動の矩形面積 (REC. area) の比較

3.4 体力測定

最大筋力、筋持久力、瞬発力、敏捷性、柔軟性を測定した体力測定の結果を表2に示す。全種目の中でエリート群の背筋力がジュニア群に較べて約15kg大きな値を示した以外は、両群間の体力に違いは見られなかった。しかし、一般人の平均値と比べると、敏捷性種目の反復横とびの結果が両群とも10回以上優れていた。

4. 考 察

シンクロナイズドスイミング競技は、足が水底に届か

ない深い水深のプール内で規定時間内に最大限のパフォーマンスを発揮して演技力、巧緻性、スピード、技の完成度などを競う。選手は常に上肢によるスカーリング動作、下肢による巻き足動作（立ち泳ぎ）を行って水中で移動したり、静止したりして身体姿勢を保っている。水中は陸上の重力のみの環境下と違い、浮力も加わるため身体のバランスを保つことが難しく、移動動作だけでなく停止して静的な姿勢を保つ局面においても多くのエネルギーを消費する。しかし、採点競技の特性上、動きの緩急、姿勢の美しさ、正確なポジショニングや演技といった身体のバランス保持にかかわる要素が勝敗に大きく影響を与えると考えられる。本研究では、国際大会において活躍している世界トップレベルの選手と国内大会レベルの選手の身体バランス能力、体力を比較することで、オリンピック、世界選手権を始め国際大会で活躍するために必要な要因を調べた。

人間のバランス能力は、視覚系、体性感覚系、前庭系、中枢処理、筋骨格系などの諸器官が関与している^[12]。本研究でも行ったように開眼と閉眼時の重心動揺（足圧中心動揺）は、常に開眼時よりも閉眼時の方が大きいことが確認され、バランスを保つために視覚系に依存するところが大きい。体性感覚系は、脚の筋紡錘、腱紡錘などの固有感覚、皮膚感覚などがバランス保持に貢献している。前庭系は頭部の平衡感覚や加速度を感知しバランスを保っている。筋骨格系は、感覚系で感知されたバランス情報が神経を介して筋に伝わり姿勢を制御するために収縮して姿勢制御に貢献する^[12]。

姿勢維持は平衡感覚、視覚及び体性感覚の統合によって行われる。大学生を対象に視覚刺激の重心動揺と不安について調査した先行研究^[13]では高不安者が立位姿勢を維持する際に視覚の手がかりへの依存度が小さいことを報告している。本研究においてもエリート群がジュニア群よりも開眼時の重心動揺が低くなったことから、ジュニア群では姿勢制御に視覚情報による貢献が低いものと考えられる。直立姿勢制御にかかわる感覚の統合は脳基底核が重要な役割を果たしていると考えられる^[14]。

表2 エリート群、ジュニア群の体力測定の結果と同世代の日本人の平均値^[11]

| Group | Elite | Junior | 18 years | 15 years |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Mean (SD) | Mean (SD) | Mean (SD) | Mean (SD) |
| Stepping (Standing) (times) | 95.0 (7.7) | 90.5 (8.4) | | |
| Stepping (Sitting) (times) | 113.4 (8.8) | 101.0 (8.2) | 107.0 (10.0) | 103.0 (11.1) |
| Jumping reaction time (sec) | 0.380 (0.073) | 0.333 (0.033) | 0.367 (0.040) | 0.361 (0.040) |
| Side step jump (times) | 52.9 (4.2) | 49.0 (5.3) | 39.3 (4.5) | 38.0 (5.0) |
| Standing-broad-jump (cm) | 183.9 (14.8) | 182.2 (7.3) | 176.0 (26.0) | 187.0 (22.0) |
| Vertical jump (cm) | 38.6 (3.0) | 40.4 (4.0) | 42.9 (6.1) | 42.9 (6.5) |
| Sitting trunk flexion (cm) | 63.3 (6.4) | 56.6 (6.9) | | |
| Grip strength (Right) (kg) | 27.8 (2.8) | 25.6 (3.4) | 27.7 (4.9) | 26.5 (5.0) |
| Grip strength (left) (kg) | 26.0 (3.1) | 24.6 (3.9) | 27.7 (4.9) | 26.5 (5.0) |
| Back strength (kg) | 75.7 (8.3) | 60.3 (14.1) | 80.9 (19.1) | 76.9 (19.3) |

これらの要因がトレーニングによって改善されるかは明らかではないが、本研究におけるジュニア群で開眼時の重心動揺が大きくなったことは熟練度の差を示すものかもしれない。

スポーツ選手のバランス能力をまとめた先行研究^[12]では、スポーツ選手は一般人に比べて、また競技レベルが高いほど、視覚依存性が低く、体性感覚や前庭感覚によるバランス能力が優れていると報告されている^[15, 16, 17, 18]。

本研究の結果では、開眼時における足圧中心点の総軌跡長、外周面積、矩形面積のすべてでジュニア群よりもエリート群の方が小さくバランス良く安定していることが示された。一方、閉眼時では両群間に差は見られなかった。これはシンクロナイズドスイミングのエリート選手は、視覚系に依存したバランス制御の貢献が高く、他の感覚系と協調してバランスを保ちながら競技を遂行する能力が高いことが推察された。しかし、競技力の高い選手は視覚系に依存しないという先行研究とは反対の結果が今回の研究でみられたことは、シンクロナイズドスイミング競技が水中環境という重力と浮力が作用する不安定な環境下で行われるスポーツであるため、常に視覚によって身体の空間的な位置の確認、姿勢の制御を行わなければ、安定した演技を遂行することが難しい競技であるということが考えられた。

重心動揺は視覚と平衡感覚および体性感覚との相互作用によって変化する。本研究におけるエリート群はジュニア群と比較して開眼時に重心動揺が低くなった。このことはエリート・アスリートは姿勢制御を視覚情報に重きを置いてなされている可能性を示唆するものである。従って、視覚情報処理能力がエリート群で優れているものと考えられる。

本研究ではフォースプレートを使用した重心動揺の測定からバランス能力を評価しているため、視覚系による貢献に関する結果が中心となる。しかし先行研究にもあるように人間のバランス制御には、視覚系だけでなく様々な感覚系、形態系の関与が示されているため、他の感覚系によるバランス能力の測定、水中環境またはそれに近い環境下での測定などを行い、総合的に評価することが今後の課題となる。

5. ま と め

閉眼時の両群間の重心動揺に関しては有意な差が認められず、開眼時の総軌跡長、外周面積、矩形面積においてエリート群の方が有意に小さい値を示したことは、エリート群が視覚情報からの姿勢制御において優れていることが考えられ、視覚が競技中の動作の安定性に影響を与えているものと推察された。

6. 謝 辞

本研究は平成20、21年度国士舘大学特色ある教育・

研究支援プログラムの助成を受けたものである。ここに深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- [1] Yamamura C., Matsui N. Kitagawa K. : Physiological loads in the team technical and free routines of synchronized swimmers. *Med. Sci Sports Exerc.*, 32 (6) : 1171-1174, 2000.
- [2] 高松潤二, 本間三和子 : シンクロナイズドスイミングの演技分析. *バイオメカニクス研究*, 9 (2) : 129-137, 2005.
- [3] 本間三和子 : シンクロナイズドスイミングにおけるスカーリングとエッグビーターキックの技術に関する文献研究. *筑波大学体育科学系紀要*, 第29巻 : 1-14, 2006.
- [4] Yamamoto N, Yanagi H, Ito Y, Inoue Y, Tanaka K, Wada T, Ishii T. : Dynamic and Static Ability of Balance and Postural Control in Japanese Obese Children. *World Congress on Biomechanics, IFMBE Proceedings*, 31 : 258-261, 2010.
- [5] Demura S, Yamaji S, Noda M, Kitabayashi T, Nagasawa Y. Examination of Parameters Evaluating the Center of Foot Pressure in Static Standing Posture from the Viewpoints of Trial-to-trial Reliability and Interrelationships Among Parameters. *Equilibrium Res.*, 60 (1) : 44-55, 2001.
- [6] Okawa T, Tokita T, Shibata Y, Ogawa T., Miyata H. : Stabilometry - Significance of Locus Length Per Unit Area (L/A) -. *Equilibrium Res.*, 54 (3) : 296-306, 1995.
- [7] Tokita T. : Stabilometry - with Reference to Focal Diagnosis in Patients with Equilibrium Disturbances -. *Equilibrium Res.*, 54 (2) : 172-179, 1995.
- [8] 長谷公隆 : 立位姿勢の制御. *リハビリテーション医学*, 第43巻8号 : 542-553, 2006.
- [9] DKH : TRIAS Hand Book, 106-107, 2008.
- [10] DKH : TRIAS 補足説明書, 34-36, 2008.
- [11] 東京都立大学体力標準値研究会編 : 新・日本人の体力標準値2000. 不昧堂, 2000.
- [12] 安部孝 : トレーニング科学. 講談社サイエンティフィク, 44-54, 2008.
- [13] Ishida M, Saitoh J, Wada M, Nagai M : Effects of anticipatory anxiety and visual input on postural sway in an aversive situation. *Neurosci Lett*, 474 : 1-4, 2010.
- [14] Brown LA, Cooper SA, Doan JB, et al : Parkinsonian deficits in sensory integration for postural control : temporal response to changes in visual input. *Parkinsonism Relat. Disord*, 12 : 376-381, 2006.
- [15] Golomer E., Cremieux J., Dupui P., et al : Visual contribution to self-induced body sway frequencies and visual perception of male professional dancers. *Neurosci Lett*, 267 : 189-192, 1999.
- [16] Guillou E., Dupui P., Golomer E. : Dynamic balance sensory motor control and symmetrical or asymmetrical equilibrium training. *Clin Neurophysiol*, 118 : 317-324, 2007.
- [17] Paillard T. and Noe F. : Effect of expertise and visual contribution on postural control in soccer. *Scand J Med & Sci sports*, 16 : 345-348, 2006.
- [18] Vuillerme N., Danion F., Marin L., et al. : The effect of expertise in gymnastics on postural control. *Neurosci Lett*, 303 : 83-86, 2001.